

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

MODERN TECHNOLOGIES OF PRODUCTION OF FLAT STEEL

Салганик В.М.

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Россия, г. Магнитогорск, 455000, пр-т Ленина, 38
chikishev_denis@mail.ru

Abstract

The article describes the development aspects of hot strip and plate mills for production of sheets with unique properties. Consider the scheme of arrangement of equipment of hot strip mills different generations. Consider the features of the production technology of pipe steels on a modern plate mill 5000 JSC "MMK". It is shown that the further development of the technology of rolling sheet must go through the creation of high-strength structural economically steels with a tensile strength of 1000 MPa or more.

Листовой прокат в больших объемах потребляется всеми отраслями промышленности. Причем к его различным видам предъявляются разнообразные сложные требования. Поэтому вопросы его производства и соответствующей технологии имеют громадное значение для народного хозяйства страны. Обратимся к современным листопрокатным агрегатам через краткий исторический экскурс. Основными объектами для производства листовой стали являются широкополосные станы горячей прокатки. 65-70% всего листового проката производят на этих станах. Крупнейшими ШСП в нашей стране являются станы 2000 ММК, Северстали и Новолипецка, а также стан 2500 ОАО «ММК». Интересно отметить, что за примерно 90 лет своего существования эти станы сохранили свою первоначальную конфигурацию – наличие

участка нагревательных печей, черновой группы клетей, промежуточного рольганга, чистовой группы, отводящего рольганга и моталок (рис. 1).

Такая компоновка оказалась весьма удачной, хотя и периодически возникали серьезные проблемы. Как известно, в 50-х годах в мире началось постепенное внедрение непрерывного литья слабов и заготовок. Масса слабов возросла с 5-10 тонн до 36-45 тонн. Возникает вопрос: как удалось реализовать такой процесс, ведь температурный градиент по длине полосы должен был возрасти до 200 градусов? Это революционное развитие стало возможным благодаря применению технологии прокатки с ускорением в чистовой группе (рис. 2). Реализовать такой режим позволил достигнутый уровень систем автоматизации скоростного режима.

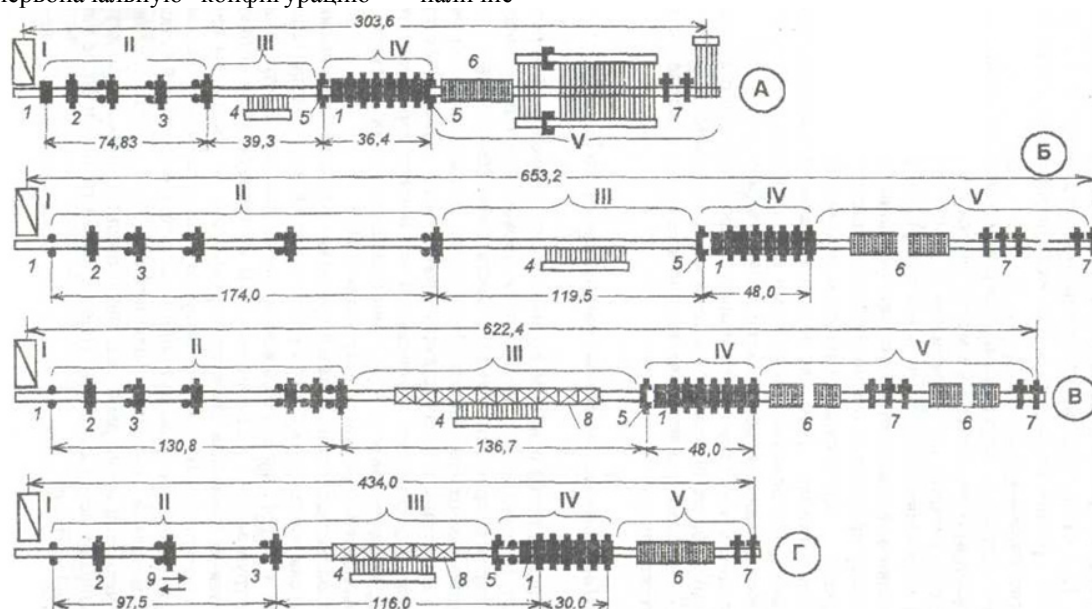


Рис. 1. Схемы расположения оборудования ШСП различных поколений:

А – 1450 ММК (1951 г.); Б – 2000 НЛМК (1969 г.); В – 2000 ММК (1975-1994); Г – 1680 «Синниппонсэйтцу», Япония (1982); I – печи методические; II – черновая группа; III – рольганг промежуточный; IV – чистовая группа; V – рольганг отводящий; 1 – окалиноломатель; 2 – клеть рабочая; 3 – клеть рабочая универсальная; 4 – карман для недокатов; 5 – ножницы летучие; 6 – установка ускоренного охлаждения; 7 – моталка; 8 – экран теплозащитный; 9 – клеть рабочая реверсивная

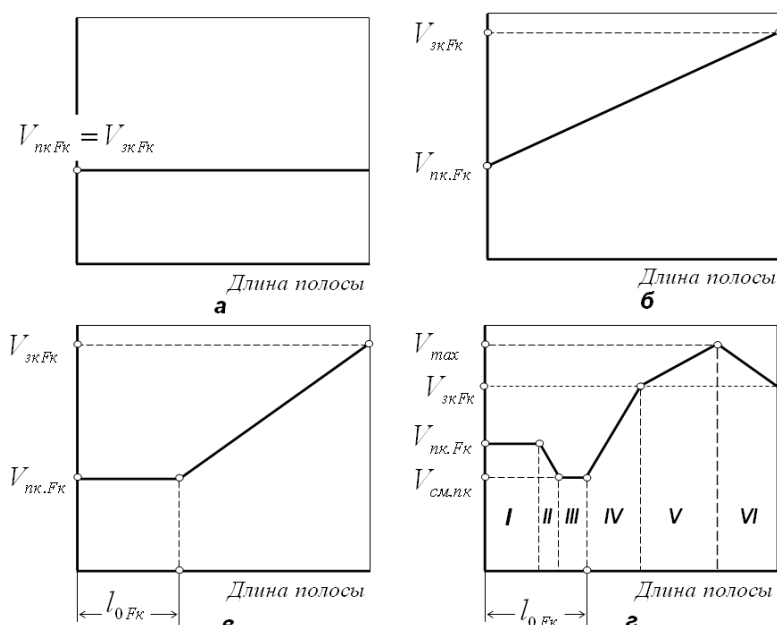


Рис. 2. Варианты скоростного режима чистовой прокатки на ШСГП: а – режим постоянной скорости; б – режим постоянного ускорения; в, г – режим переменного ускорения (I – пропуск переднего конца; II – торможение перед моталкой; III – заправка в моталку; IV, V – прокатка середины полосы, VI – выпуск и смотка заднего конца)

Создание и развитие ШСГП фактически явилось результатом революционных достижений в технике и технологии листовой прокатки. Само появление ШСГП обязано реализации высокоточных автоматических систем управления скоростью рабочих валков чистовых клетей. Следующий революционный скачок – это освоение и внедрение в качестве полупродукта непрерывнолитых слябов. Следующее революционное достижение – это создание тонкослябовых литейно-прокатных агрегатов, которые исключили необходимость черновой прокатки при производстве листов.

Сортамент широкополосных станов также существенно развивался от минимальной толщины 2 мм до 1,0 и даже 0,8 мм. И в сторону толстых полос – от 14-16 до 25 мм. Стремление расширить сортамент ШСГП было обусловлено его экономичностью – минимальными расходным коэффициентом и затратами энергии. Параллельно с широкополосными развивались и толстолистовые станы – одно- и двухклетевые. Одним из последних достижений толстолистовой прокатки – это строительство и успешное освоение станов 5000 на ОАО «ММК» (рис. 3) и в г. Выкса.

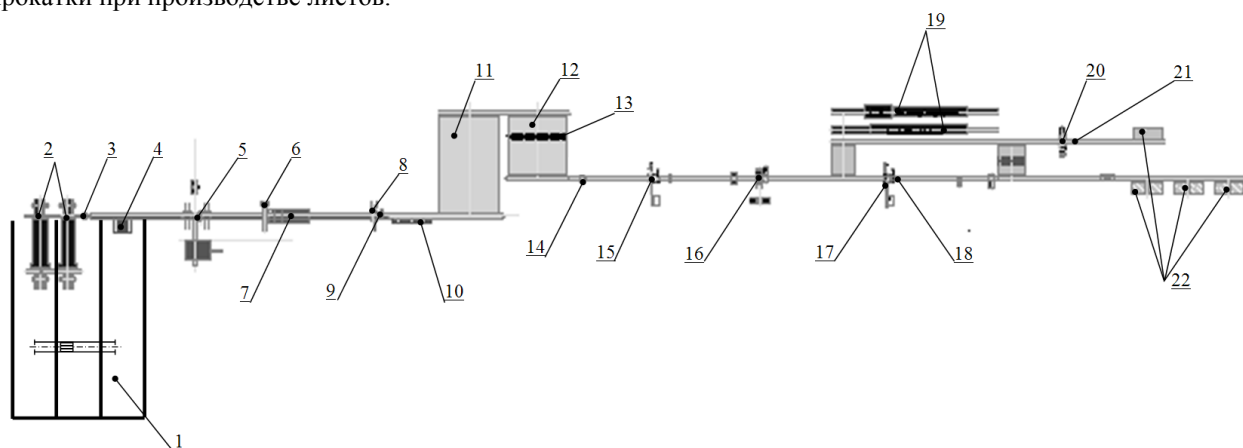


Рис. 3. Схема расположения оборудования стана 5000 ОАО «ММК»: 1 – Склад слябов; 2 – Нагревательные печи; 3 – Первичный гидросбив окалины; 4 – Карман для листов свыше 50 мм; 5 – Рабочая клеть; 6 – Роликоправильная машина №1 (горячей правки); 7 – Установка ускоренного охлаждения; 8 – Роликоправильная машина №2; 9 – Клеймитель; 10 – Карман ПФО (противофлокенного охлаждения); 11 – Холодильник; 12 – Инспекторский стол; 13 – Кантователь; 14 – УЗК; 15 – Ножницы поперечной резки (для обрезки торцов); 16 – Ножницы продольной резки; 17 – Ножницы №2 поперечной резки (для порезки на мерные длины); 18 – Маркировщик; 19 – Термические печи; 20 – Роликоправильная машина №3 (холодной правки); 21 – Маркировщик; 22 – Карманы

Очевидно, что развитие крупнейшего оборудования для производства листовой стали не являлось самоцелью, а было направлено на получение новой продукции – продукции с уникальными свойствами. Серьезный запрос на такую продукцию предъявила, прежде всего, трубная отрасль. Требовались трубные заготовки с уникальным комплексом механических свойств, достигаемых в процессе прокатки. Соответствующие технологические аспекты получения проката с требуемым комплексом

Таблица 1 – Массовая доля в трубных сталях*

Класс прочности	Массовая доля элементов, % не более						
	Ni	Mo	V	Nb	Ti	Cu	Cr
K56	0,30	-	0,08	0,08	0,035	0,3	0,3
K60	0,30	0,35	0,12	0,10	0,035	0,3	0,3
K65	0,35	0,35	0,10	0,10	0,030	0,3	0,3

*Cr+Ni+Cu не более 0,6% для K56-K60 и не более 0,7% для K65; Nb+V+Ti не более 0,15%

Никель способствует получению структуры игольчатого феррита, повышает прочность стали, не снижая ее вязкости, увеличивает прокаливаемость и повышает сопротивление коррозии. Молибден повышает устойчивость переохлажденного аустенита, препятствуя выделению полигонального феррита и перлита, что благоприятствует образованию бейнита, островков мартенсита и остаточного аустенита. Ванадий образует частицы малого размера в процессе прокатки и, в особенности, после $\square \rightarrow \square$ превращения, которые обеспечивают вклад в упрочнение стали по механизму дисперсионного твердения. Ниобий в различных формах его присутствия (в твердом растворе аустенита или феррита, в виде частиц фазы NbC)

свойств заключались в следующем: во-первых, это применение стали определённого химсостава, включающего микролегирующие элементы (табл. 1).

Влияние легирующих элементов на свойства стали обусловлено действием на измельчение зерна, упрочнением феррита вследствие образования твердых растворов внедрения и замещения, упрочнением в результате выделения частиц второй фазы различной степени дисперсности и изменением прокаливаемости. основных микролегирующих элементов

оказывает благоприятное влияние на все процессы структурообразования при термомеханической прокатке стали: измельчение зерна аустенита, торможение рекристаллизации, формирование бейнита, измельчение зерна феррита, дисперсионное твердение. Титан при нагреве формирует карбонитриды с высокой долей азота в составе, которые стабильны при высоких температурах и позволяют контролировать размер зерна аустенита. Содержание титана в сталях с обычным содержанием азота не должно превышать 0,03%. Ti применяют для связывания азота при его стехиометрическом соотношении $Ti = 3,4 N$. Медь и хром увеличивают прокаливаемость и прочность стали, повышают сопротивление коррозии.

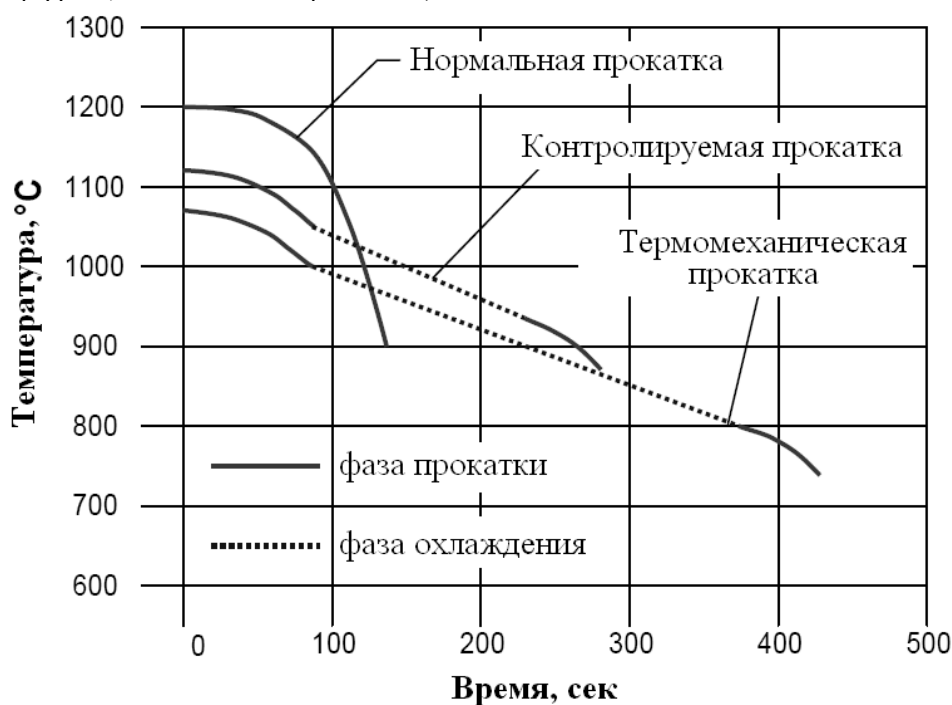


Рис. 4. Температурно-деформационные режимы прокатки

Следующий аспект, относящийся непосредственно к технологии – это температурно-деформационные режимы прокатки (рис. 4). На современных толстолистовых станах возможна реализация трех типов прокатки:

- нормальная прокатка, при которой лист прокатывается без учёта специальных температурных требований и обжатий по толщине;
- контролируемая прокатка, при которой лист прокатывается в клети стана с учётом температурных требований (контролируется температура конца прокатки);
- термомеханическая прокатка, при которой лист прокатывается в клети в два (три) этапа, с учётом температурных требований и требований обжатий по толщине. Температура конца прокатки, как правило, меньше 800 °С.

Регулируемое ускоренное охлаждение после прокатки позволяет осуществить термическое упрочнение толстолистовой стали с прокатного нагрева. На современных толстолистовых станах осуществляются следующие стратегии охлаждения (рис. 5): ускоренное охлаждение; прямая закалка; закалка с самоотпуском.

После ускоренного охлаждения наблюдается повышение прочностных характеристик (по пределу текучести до 5%, временному сопротивлению – до 10%), в некоторых случаях – ударной вязкости (до 25%), относительное удлинение, как правило, снижается (примерно на 10%).

В результате механические свойства готового проката характеризуются следующим комплексом показателей (табл. 2).

Таблица 2 – Механические свойства трубных сталей

Класс прочности	$\sigma_{\text{Т}}$, МПа	$\sigma_{\text{В}}$, МПа	δ_5 , %	KCV ⁻²⁰ , Дж/см ²
K56	430-560	550-660	22	90
K60	490-615	590-710	22	140
K65	565	640	20	260

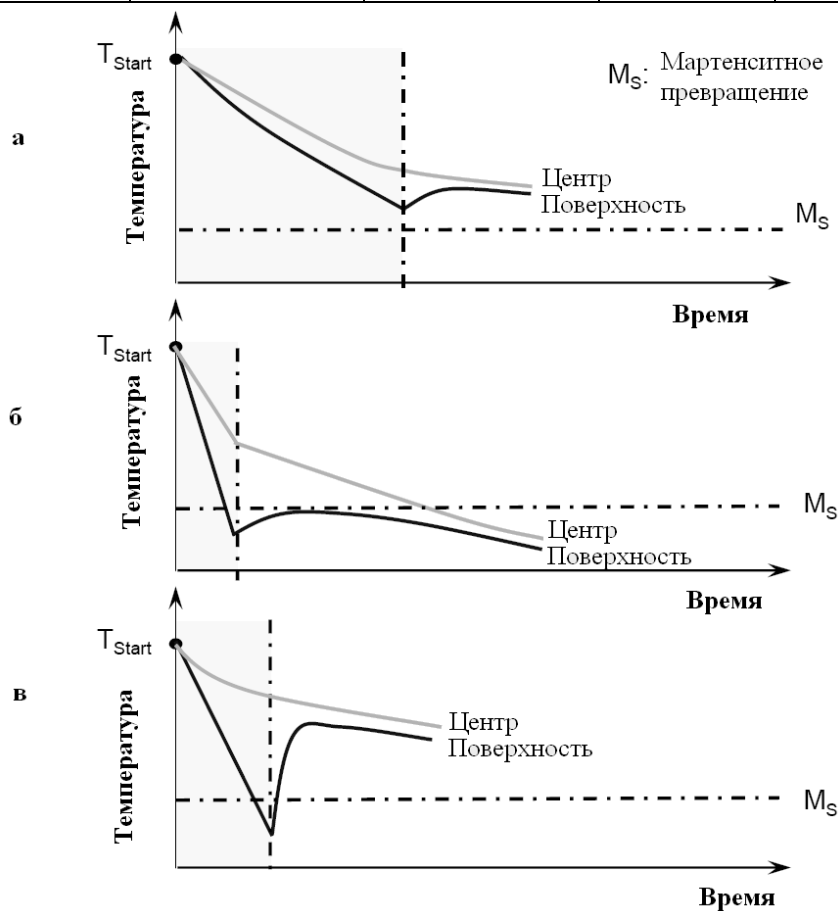


Рис. 5. Режимы охлаждения: а – ускоренное охлаждение; б – прямая закалка; в – закалка с самоотпуском

В период освоения нового сверхмощного сложного объекта – стана 5000 ОАО «ММК» учеными кафедры ОМД «МГТУ» совместно с

инженерами ЦЛК решался ряд важных вопросов технологического обеспечения этого стана на основе разработки и использования эффективных

математических моделей. В частности, решались следующие задачи:

- выбор сталей перспективных марок и пластометрические исследования их сопротивления деформации;

- разработка и моделирование в среде DEFORM режимов контролируемой прокатки на ТЛС 5000 трубных сталей; опробование и коррекция разработанных режимов;

- пластометрические исследования сопротивления деформации сталей, прокатываемых на стане 5000;

- анализ заказов на стане 5000; моделирование процесса прокатки на основе инженерных методов по выбранным заказам;

- дилатометрические исследования для совершенствования технологии контролируемой прокатки микрелегированных сталей;

- исследование микроструктуры трубных сталей класса прочности K60 (X70) при черновой прокатке на стане 5000 ОАО «ММК» (постановка задачи и начальный этап решения).

Ясно, что при этом возникали вопросы и проблемы, ответы на которые заранее не были известны. Их пришлось отыскивать в процессе исследования. В результате установили, проанализировали и подытожили ряд новых научно-технических положений. Кратко представим эти положения.

1. Применили новый способ определения СМД на основе решения так называемой обратной задачи и использования соответствующей методологии. Сущность постановки и решения обратной задачи заключается в том, что пластометрическая информация поступает непосредственно с действующего оборудования, которое, выполняя свои основные функции, одновременно играет роль пластометра (например, прокатный стан-пластометр).

2. Для построения эффективных режимов прокатки использовали два различных подхода: фундаментальный – на основе метода конечных элементов и программного комплекса DEFORM, а также инженерный – с помощью алгоритма, реализующего известные принципы и процедуры.

3. Выполнили дилатометрические исследования фазовых превращений новых марок стали. Получили и представили уникальную информацию относительно поведения этих новых материалов, критических значений температуры, что позволило уточнить применяемые режимы прокатки.

4. Поставили задачу и выполнили начальный этап моделирования микроструктуры проката при черновой стадии процесса. Это позволило уточнить требования к черновым проходам при контролируемой прокатке.

В конечном счете, указанные исследования позволили выйти на существенные внедренческие предложения и улучшить применяемые режимы прокатки. Основой для этих рекомендаций послужили следующие аспекты выполненной работы:

- моделирование на фундаментальном уровне напряженно-деформированного и теплого состояния толстых листов в процессе прокатки с использованием программного комплекса DEFORM;

- использование для определения сопротивления металла деформации новой методологии с решением обратной задачи;

- исследование микрелегированных сталей различных марок с использованием дилатометра NETZSCHDIL 402-C, позволяющее определить критические точки фазовых превращений и при реализации низкотемпературной стратегии контролируемой прокатки – скорректировать температуру конца процесса, при реализации высокотемпературной стратегии – однозначно установить нижние границы температурного интервала аустенитной области;

- комплексный анализ действующей технологии производства проката из трубных марок стали классов прочности K52, K56, K56, K60, X70 на стане 5000 ОАО «ММК».

В итоге предложены соответствующие поправки температурных режимов, реализуемых действующей технологией, с точки зрения реологии и фазовых превращений материала. Впервые ограничена минимальная температура начала ускоренного охлаждения в условиях реализации низкотемпературной стратегии прокатки. Очевидна необходимость продолжения исследований подобного рода, прежде всего, для понимания природы фазовых превращений новых высокопрочных марок стали, а также для последующего эффективного освоения производства толстолистового проката из таких сталей. Реализована также начальная стадия (для условий черновой прокатки) моделирования эволюции микроструктуры низколегированных сталей.

В результате всех выполненных исследований определены основные технологические параметры производства высокопрочного проката категории K56-K65 при прокатке на стане 5000.

В современном листопрокатном производстве важное место принадлежит тонкослябовому литейно-прокатному агрегату. Они состоят из машин непрерывного литья относительно тонких полос от 60 до 35 мм, проходной печи или устройств промежуточной смотки и непрерывной группы клетей. Конкретный агрегат может иметь самый разнообразный состав компонентов [1]. К сожалению, таких действующих агрегатов нет в России, хотя имеется современный агрегат на заводе ОАО «ММК» в Турции (г. Искендерун).

Одной и серьезных сложностей в создании и эксплуатации таких агрегатов являются существенно различные скорости работы литейной части и прокатной, отличающиеся на порядок. Компенсирует этот недостаток двумя основными мерами:

1. Применение длинных проходных печей, в которых тонкий сляб перед задачей в стан разгоняется;
2. Применение промежуточной смотки тонких слябов.

Представляют максимальный интерес получение конструкционной сверхпрочной легированной стали с экстремальными

механическими свойствами (предел текучести – до 1250 МПа, временное сопротивление – до 1700 МПа, относительное удлинение – до 19%).

Стратегическим направлением такого производства является импортозамещение конструкционных легированных сталей (типа DOMEX, HARDOX, WELDOX и RAEX) (табл. 3-6).

Таблица 3 – Химический состав стали DOMEX

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Nb	V	Cu	Ti	Al	N
0,10-0,21	0,03-0,50	1,40-1,50	0,020-0,025	0,005-0,010	0,80	2,0	0,70	0,005	0,04-0,09	0,08-0,20	0,10	0,02-0,15	0,015-0,020	0,010

Таблица 4 – Химический состав стали HARDOX

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0,47	0,70	1,00	0,015	0,010	1,20	2,50	0,80	0,004

Таблица 5 – Химический состав стали WELDOX

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Nb	V	Cu	Ti	Al	N
0,25	0,50	1,40	0,020	0,005	0,80	2,00	0,70	0,005	0,04	0,08	0,10	0,02	0,020	0,010

Таблица 6 – Химический состав стали RAEX

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0,18-0,30	0,80	1,70	0,025	0,015	1,00-1,50	1,00	0,50	0,005

Современные возможности ведущих мировых производителей конструкционного проката позволяют осуществлять серийное производство сталей класса прочности от 235 до 355. В то же время не решена проблема получения сталей более высоких классов прочности (S450 и

выше), хотя имеется широкий круг потенциальных потребителей такого металла в области общего машиностроения, автомобилестроения, строительства и др.

Таблица 7 – Механические свойства конструкционных легированных сталей

Сталь	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Удлинение A ₅ , %	Твердость, HBW
DOMEX	420-1200	480-1350	8-20	-
HARDOX	1000-1650	1250-2000	-	370-640
WELDOX	355-1300	450-1700	8-20	-
RAEX	900-1250	1000-1600	8-11	270-540

Таким образом, дальнейшее развитие технологии листовой прокатки должно идти за счет создания высокопрочных экономнолегированных конструкционных сталей толщиной 3-8 мм, с пределом текучести не менее 450 МПа, пределом прочности не менее 510 МПа, улучшенной свариваемости и коррозионной стойкости. Уже возникает новая актуальная задача по достижению предела прочности 1000 МПа и более, а также предела текучести в диапазоне 355-1250 МПа.

Библиографический список

1. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос: Учеб. пособие / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 506 с.